90-0162
5,00 $

ESSAIS DE RÉSISTANCE DES MURS AUX BALLES DE FOIN PÊLE-MÊLE

Rapport final

Québec

93-01729/

RAPPORT FINAL

ESSAIS DE RÉSISTANCE DES MURS AUX BALLES DE FOIN PÊLE-MÊLE

EFFECTUÉS PAR

URGEL DELISLE ET ASSOCIÉS

POUR LE

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, DES PÊCHERIES ET DE L'ALIMENTATION DU QUÉBEC

AVANT-PROPOS

Le Service du génie et la Direction de la recherche et du développement du Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec ont confié à la firme Urgel Delisle et Associés le mandat de réaliser une étude sur la résistance des murs aux balles de foin entreposées pêle-mêle.

Nous tenons à remercier les principaux collaborateurs à ce projet:

M. Henri Maheux, ing. et agr.
Service du génie
Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation
Tél.: (418) 643-2534

M. Michel S. Cournoyer, ing. et agr.
M. Gilles Bolduc, ing. et agr.
M. Patrick Provost, d.t.a.

Urgel Delisle et Associés
Tél.: (514) 584-2207

Nous remercions également M. Laurent Blais, producteur agricole, de Saint-Paul-d'Abbotford pour avoir mis à notre disposition son bâtiment et pour sa précieuse collaboration au succès de ce projet.

PRINTEMPS 1990

SOMMAIRE

Des essais ont été réalisés dans une remise à foin, afin de déterminer la grandeur des charges additionnelles auxquelles sont soumis les murs du bâtiment, lorsque les balles de foin sont entreposées pêle-mêle. Le foin utilisé lors des essais avait un taux d'humidité variant entre 20% et 35%, au moment de sa récolte, soit un taux représentatif de celui rencontré chez bon nombre de producteurs utilisant un séchoir à foin. Les charges ont été mesurées pour des hauteurs de foin atteignant un maximum de 7 mètres, au centre du cône.

Les relations développées établissent le lien entre la hauteur des balles de foin et les charges qui en résultent. Les résultats montrent que la poussée horizontale des balles est faible en comparaison à d'autres produits agricoles. Les essais ont été effectués durant les étés 1987, 1988 et 1989.

TABLE DES MATIÈRES

1. SITE DES ESSAIS..... 14

2. MÉTHODOLOGIE..... 15

2.1 Généralités..... 15
2.2 Description du mur d'essai..... 15
2.3 Construction du mur..... 19
2.4 Instruments de mesure des charges..... 19
2.5 Autres mesures effectuées et données recueillies..... 21

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION..... 23

3.1 Angle de repos..... 23
3.2 Taux d'humidité..... 25
3.3 Affaissement..... 26
3.4 Charges..... 26

3.4.1 Généralités..... 26
3.4.2 Charges verticales..... 27
3.4.3 Charges horizontales..... 31
3.4.4 Coefficient de friction..... 37
3.4.5 Résultats de 1987..... 37

4. CONCLUSIONS..... 41

5. RECOMMANDATIONS..... 42

LISTE DES FIGURES

PAGE

Figure 2.1 Schéma en coupe de la remise utilisée et de la position du mur à l'intérieur..... 16

Figure 2.2 Schéma du mur d'essai..... 18

Figure 3.1 Illustration de la hauteur de foin choisie pour l'interprétation des résultats..... 27

Figure 3.2 Relation entre la hauteur des balles de foin et les charges verticales pour 1988..... 29

Figure 3.3 Relation entre la hauteur des balles de foin et les charges verticales pour 1989..... 30

Figure 3.4 Relation entre la hauteur des balles de foin et les charges latérales pour 1988..... 33

Figure 3.5 Relation entre la hauteur des balles de foin et les charges latérales pour 1989..... 34

Figure 3.6 Relation entre la hauteur des balles de foin et les charges latérales pour 1987..... 39

LISTE DES ANNEXES

Annexe A	Plan du mur
Annexe B	Photos du mur et des vérins
Annexe C	Densité des balles de foin en fonction du taux d'humidité
Annexe D	Charges mesurées

INTRODUCTION

Au Québec, certains producteurs agricoles entreposent les balles de foin dans les remises, de façon pêle-mêle. Cette méthode d'entreposage occasionne des charges verticales additionnelles à celles déjà existantes en plus d'ajouter des charges horizontales sur les murs des remises. Ces charges supplémentaires ne sont pas connues et elles sont difficiles à évaluer. L'établissement d'une relation entre les balles de foin pêle-mêle et le grain, les épis de maïs ou encore les pommes de terre est difficilement réalisable étant donné la grande différence entre ces produits (principalement sur la grosseur des agrégats ou des unités) et la différence des modes de construction des murs par rapport à chaque produit (ex: balles de foin vs murs lattés; pommes de terre vs mur plein).

Afin d'optimiser la conception des bâtiments destinés à l'entreposage des balles de foin pêle-mêle, il est donc nécessaire de procéder à des mesures réelles des charges qui en résultent.

OBJECTIF

L'objectif du présent projet vise à mesurer les efforts horizontaux et verticaux, transmis par les balles de foin, pour différentes hauteurs d'entreposage, sur le mur d'une remise à foin lorsque les balles sont entreposées pêle-mêle. Les efforts maximums d'une remise utilisant un séchoir sont recherchés.

1. SITE DES ESSAIS

Afin de trouver un site pour effectuer les essais, des représentants de divers bureaux locaux du Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec ont été contactés. Ceux-ci ont fourni les noms de certains producteurs agricoles utilisant la méthode d'entreposage des balles de foin sous le mode pêle-mêle. Un contact avec les différents producteurs a permis d'en venir à une entente avec M. Laurent Blais, de Saint-Paul-d'Abbotsford, comté de Rouville, qui a accepté de participer aux essais.

M. Blais entrepose sur sa ferme les balles de foin dans une remise à structure de bois, en forme de "A". Dans le but de réaliser les essais, il fut convenu au départ avec le producteur, d'effectuer des modifications à l'intérieur de la grange et de construire un mur vertical susceptible de recevoir les instruments de mesures nécessaires au projet et en même temps de pouvoir simuler les murs verticaux de la majorité des remises à foin du Québec. Cette remise contient aussi un séchoir à foin.

2. MÉTHODOLOGIE

2.1. Généralités

La méthodologie suivie pour recueillir les données est décrite ci-après. Elle fut établie suite à une première série de mesures effectuées en 1987. Ces mesures ont permis de constater les points faibles du montage utilisé pour les essais et d'apporter les modifications jugées nécessaires. Ensuite, d'autres mesures ont été prises au cours de l'été 1988 et 1989 pour voir la répétition des résultats dans le temps. La première récolte de foin était utilisée pour remplir la remise et l'espace dégagé par l'écrasement et le séchage du foin au cours de l'été était comblé avec des balles de foin de la deuxième coupe.

2.2. Description du mur d'essai

Un mur de bois, constitué de trois panneaux superposés, a été retenu pour les essais. La figure 2.1 présente une vue en coupe de la remise et illustre de façon schématique la position du mur d'essai à l'intérieur du bâtiment. Un croquis d'installation montrant les détails est donné en annexe A. Le cadrage des panneaux et les lattes ont été construits pour être représentatifs des murs construits au Québec pour les remises à foin.

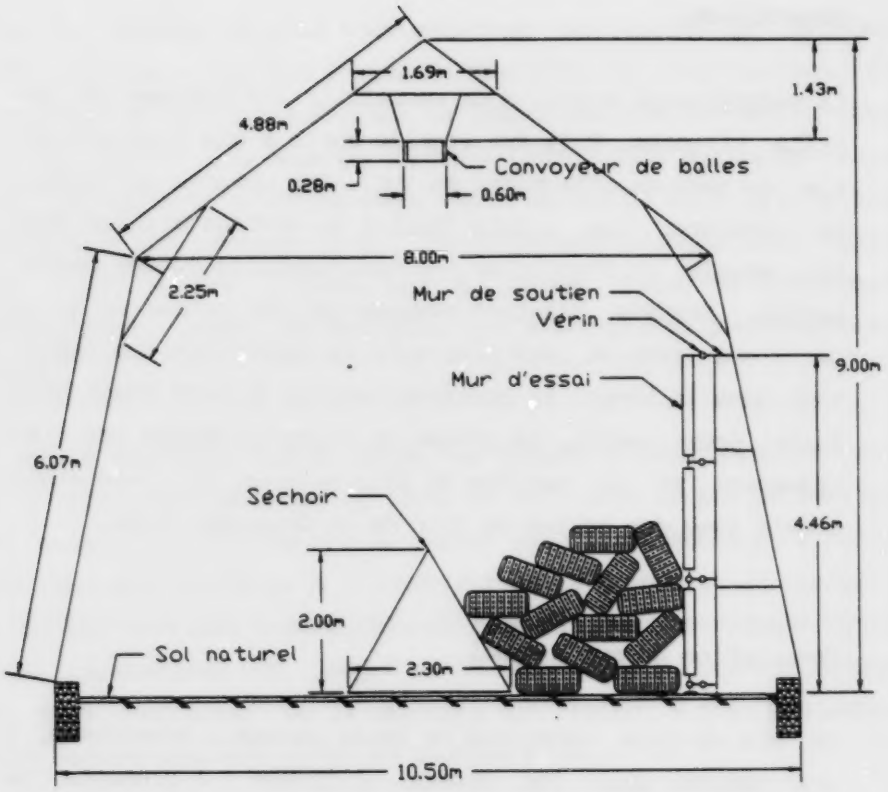


FIGURE 2.1: SCHÉMA EN COUPE DE LA REMISE UTILISÉE ET DE LA POSITION DU MUR A L'INTÉRIEUR

Le mur d'essai est divisé en trois sections, chacune indépendante l'une de l'autre. La section, servant aux mesures et formée de trois panneaux, est placée au centre de deux autres sections fixes. Ces dernières sont utilisées seulement pour éviter les effets de fin de mur, puisque les mesures ne s'effectuent que sur une courte distance. La figure 2.2 illustre le mur d'essai.

Le mur est donc monté en trois sections distinctes et placé à la verticale. La section centrale mobile du mur a une largeur de 3660 mm, tandis que les sections de chaque côté ont des largeurs de 1800 mm. La hauteur totale du mur est de 4460 mm. Chaque panneau mobile est formé d'un cadre en madriers de 38 x 184 mm à l'intérieur duquel des entremises de mêmes dimensions sont placés à l'horizontale avec un espacement de 450 mm. Le mur est recouvert, sur sa face servant d'appui aux balles, de lattes verticales 38 x 64 mm espacées de 400 mm, centre à centre.

Le mur tel que construit s'appuie sur la structure même du bâtiment ainsi que sur ses fondations par l'entremise d'un deuxième cadre de bois très rigide (voir annexe A). Pour les sections de bouts, l'appui est fixe, alors que pour la section centrale l'appui entre le cadre rigide et le mur d'essai se fait par l'entremise de vérins hydrauliques au nombre de huit.

L'appui au sol est direct pour les sections de bouts, alors qu'elle se fait par l'entremise de vérins hydrauliques pour la section mobile.

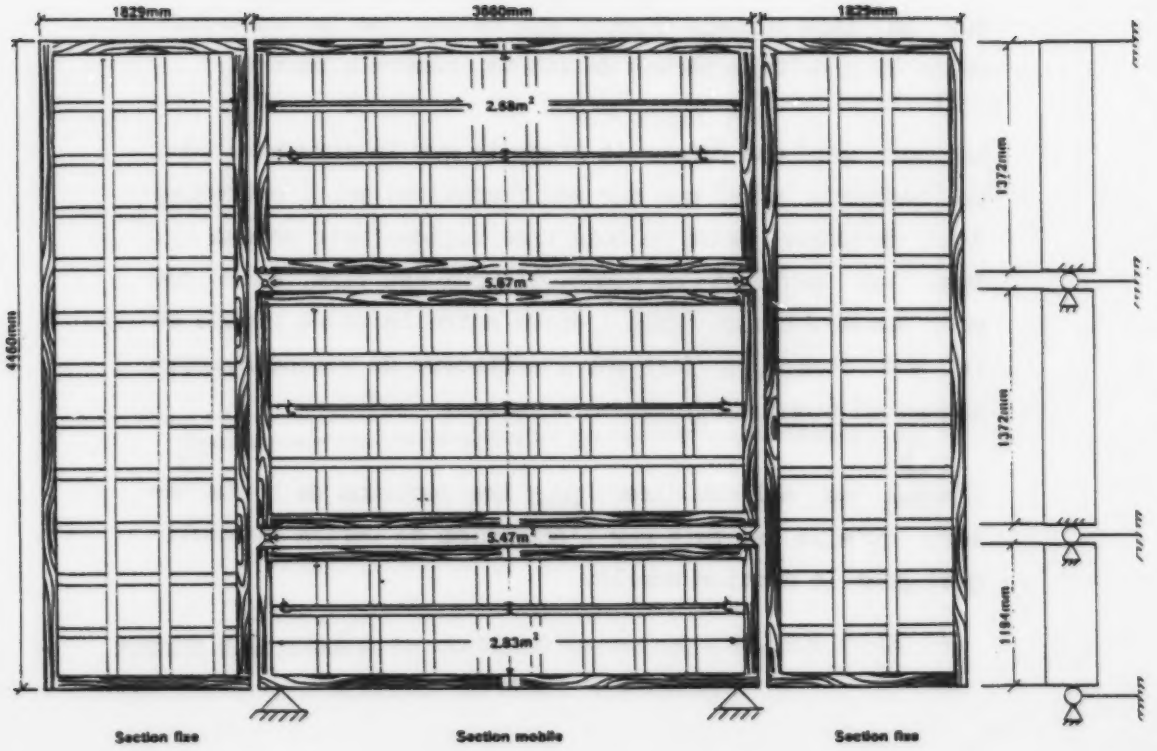


FIGURE 2.2: SCHÉMA DU MUR D'ESSAI

2.3. Construction du mur

Le mur construit par des artisans fut mis en place dans la semaine du 10 août 1987. La construction et la mise en place ont été effectuées sous la supervision du personnel de la firme Urgel Delisle et Associés et ont duré une semaine environ. Le mur a été réalisé tel que prévu au plan (Annexe A) sauf que le mur de soutien (cadre rigide) a été largement renforcé, afin de permettre une distribution de la charge sur une plus grande superficie de la structure du bâtiment et de minimiser les mouvements dus à des poussées trop grandes (fléchissement).

Dans le but de restreindre le mouvement latéral et de minimiser le frottement entre les panneaux mobiles et les parties fixes du mur, des goujons en bois ont été introduits sur les côtés des panneaux, tels que montrés à l'annexe B.

2.4. Instruments de mesure des charges

Dans le projet initial, il était proposé d'utiliser des jauges raccordées à un appareil enregistreur électronique pour recueillir les données. Des démarches pour se procurer les instruments ont permis de constater qu'il n'était pas possible de les louer pour la durée du projet et que l'achat était trop onéreux, compte tenu du budget disponible.

L'alternative consistait à utiliser des vérins hydrauliques adaptés aux besoins du projet. Celle-ci fut retenue et une firme spécialisée en circuits hydrauliques

fut mandatée pour l'assemblage des vérins. Chacun des vérins, de type industriel, est raccordé à un manomètre au moyen d'un boyau hydraulique de 60 cm de longueur. Le boyau permet de localiser le manomètre en un endroit facilement accessible pour la prise des lectures.

La capacité de charge des vérins est de 17 kN et la superficie du piston est de 450 mm^2. Les manomètres des vérins servant aux mesures de charges verticales ont une plage de lecture de 0 à 35 MPa, alors que ceux des vérins servant aux mesures de charges latérales ont une plage de lecture de 0 à 7 MPa. Les lectures sont précises à plus ou moins 10 kg (98 N).

Tel que mentionné à la section précédente, le mur est composé de trois sections toutes reliées à la structure du bâtiment par huit vérins placés à l'horizontale. Deux vérins placés à la verticale, sont situés à la base et à chaque extrémité du panneau inférieur, alors que deux autres vérins sont situés sur le dessus du panneau inférieur et supportent les deux panneaux supérieurs. La position des vérins est indiquée à la figure 2.2, ainsi qu'à l'annexe B.

Tous les vérins permettent un mouvement des panneaux de l'avant vers l'arrière. Il y a peu de mouvement latéral entre chacun des panneaux, de sorte que latéralement, le déplacement est possible pour l'ensemble du mur seulement. Tous les panneaux ont été enlignés et équilibrés avant le début de chaque saison de prise de lectures.

2.5. Autres mesures effectuées et données recueillies

a) Lors de chaque session de lecture de pression sur le mur, des mesures du taux d'humidité du foin à la récolte, fraîchement rentré et du foin emmagasiné, ont été prises sur place à l'aide d'un lecteur d'humidité de type Delmhorst, modèle F4. A chaque session, des lectures d'humidité étaient effectuées sur le dessus de la pile de balles et à la base du mur. La moyenne de trois lectures par balle de foin servait de valeur d'humidité pour cette balle. La relation avec des échantillons analysés en laboratoire a été jugée adéquate pour ce type de projet.

b) L'angle d'éboulement des balles était mesuré au moyen d'une perche et d'un rapporteur d'angle lors de chaque session de lecture des pressions et à plusieurs endroits.

c) La masse, la dimension et le taux d'humidité d'un certain nombre de balles de foin ont été prises lors des récoltes du mois de juin 1988 et 1989, dans le but d'établir une relation entre le pourcentage d'humidité et la densité des balles de foin. Les résultats sont présentés à la section 3 et à l'annexe C. L'affaissement de la masse a aussi été mesuré.

d) Initialement des mesures de l'impact des balles de foin frappant le mur étaient prévues. Suite à l'observation des balles tombant sur le mur d'essai, il n'a pas été possible de tirer de conclusion. Plusieurs raisons expliquent ceci. Tout d'abord, pour noter l'effet de l'impact d'une balle, il faut nécessairement vérifier le bon manomètre au bon mo-

ment. Puisque les balles tombent au hazard et rapidement, il est particulièrement difficile de prévoir sur quel manomètre la balle aura un effet.

D'autre part, le mur possède une certaine inertie, de telle sorte qu'il absorbe une partie du choc. Lors de l'impact d'une balle sur le mur, les forces de frottement, entre les panneaux et les parties fixes des extrémités, même si elles sont faibles, contribuent à absorber le choc. Une force d'impact minimale est donc nécessaire pour pouvoir effectuer une lecture sur un manomètre.

e) L'huile contenue dans les vérins hydrauliques réagit aux changements de température. En supposant que le piston des vérins est fixe, lors d'une augmentation de la température, le manomètre d'un vérin donné devrait montrer une augmentation de pression.

Cependant, les panneaux du mur, auxquels sont rattachés les vérins, ne sont pas fixes. Un mouvement, si petit soit-il, est suffisant pour compenser le changement de volume de l'huile dans les vérins lorsque la température augmente ou qu'elle diminue. Nous croyons donc qu'il n'y a pas lieu d'appliquer de facteur de correction, pour les changements de température, aux lectures prises.

D'autre part, outre les données recueillies à l'automne, la majorité des prises de lecture de l'été ont montré des températures stables, permettant une précision suffisante des lectures, sans compensation de la température.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les mesures de charges recueillies sont données et présentées sous forme de graphiques dans la présente section. Les tableaux des données ayant été utilisés pour les graphiques sont fournis à l'annexe D. Dans le texte, lorsque l'on parle de deuxième récolte, il s'agit de la récolte pour remplir l'affaissement du foin.

3.1. Angle de repos

Lors de la première année (1987), l'angle de repos des balles était variable et généralement assez élevé. Il a été noté que l'angle variait le plus souvent entre 40° et 60°. La première année, la rentrée des balles de foin s'est effectuée en deux fois seulement. La première rentrée fut lors de la récolte du 28 août 1987, par le cultivateur. La deuxième rentrée eut lieu le 12 octobre 1987, alors que le producteur a acheté du foin.

Pour la deuxième année, l'angle de repos mesuré variait entre 25° et 45° pour se situer le plus fréquemment entre 30° et 35°. Nous croyons que la différence observée entre les valeurs des deux années est due à la méthode de remplissage de la remise et à d'autres facteurs tels que l'humidité et la masse.

La première année le remplissage de la remise s'étant effectué en deux jours seulement, il nous apparaît normal que l'angle de repos ait été plus grand, à cause de la grande quantité de balles qui s'empilent en peu de temps, du taux d'humidité peu élevé et de la masse plus molle des balles qui s'écrasent au lieu de rouler vers le bas de la pente.

A la deuxième année (1988), le remplissage s'est effectué de façon régulière sur une période de plusieurs jours (6 jours) lors de la récolte. Ainsi, de plus petites quantités furent entassées dans la remise à chaque remplissage. De plus, la rentrée s'effectuant sur plusieurs jours consécutifs, un affaissement se produisait entre les remplissages. Le taux d'humidité et la masse des balles étaient plus élevés, ce qui favorisait leur déboulement au bas des pentes, mais aussi un plus grand affaissement, au cours du remplissage, à cause du séchage graduel du foin.

Au cours de la troisième année (1989), les angles de repos ont varié entre 22° et 40°, mais plus souvent entre 30° et 35°. Le taux d'humidité des balles de foin était presque semblable à celui de 1988. Cependant, comme en 1987, le remplissage a été effectué très rapidement (à cause de la température favorable) soit le 30 juin et les 3 et 4 juillet, la plus grande partie du foin ayant été entrée ces deux derniers jours. Il s'agit donc d'une situation à mi-chemin entre les deux années précédentes.

Les deux dernières années (1988 et 1989) représentent donc une situation normale pour la majorité des producteurs. Dans la pratique, on devrait donc s'attendre à rencontrer des angles de repos variant de 25° à 50°, mais dont la majorité probable se situerait entre 30° et 35°. Ce dernier écart pourrait donc servir à déterminer la hauteur du cône formé par la tombée du foin, si la lecture est prise au niveau du mur. De plus, une pente naturelle faible se situe à 22° et une pente naturelle forte à 43°.

3.2. Taux d'humidité

Lors de la première année (1987), compte tenu de la température au moment de la récolte, le foin fut remisé très sec. La majorité des observations se situaient entre 11% et 16%, soit un taux d'humidité jugé acceptable pour la conservation.

Au cours de la deuxième année (1988), le taux d'humidité, lors des récoltes, était très variable. Pour la récolte en juin, le taux d'humidité variait entre 21% et 35%. Un grand nombre de balles de plusieurs voyages ont même montré des taux de plus de 40% d'humidité (limite de lecture de l'appareil). Pour la récolte de septembre, des taux de 15% et 18% ont été observés.

Au cours de la troisième année (1989), le taux d'humidité lors de la récolte de juin était moins variable et un peu moins élevé qu'en 1988 puisque tout le foin a été rentré dans un cours laps de temps et dans les mêmes conditions atmosphériques. Bien que le taux atteignait souvent 30 à 35%, un plus faible pourcentage de balles dépassait la limite de lecture de l'appareil, soit 40%. Le taux d'humidité a donc varié entre 20 et 38%, avec un écart plus concentré entre 25 et 35%.

Considérant qu'un taux d'humidité de 35% environ est un maximum recommandé auquel le foin doit être remisé, pour un séchage sans problèmes de moisissure et d'échauffement, nous croyons que les charges mesurées, suivant les conditions d'humidité et de vitesse de remplissage obtenues en 1988 et 1989, représentent bien pour le Québec la plage de situation que rencontreront la majorité des producteurs en général. Une relation entre le taux d'humidité et la densité des balles de foin est donnée à l'annexe C et montre une grande différence entre 1988-89.

En 1988 et 1989, le taux d'humidité atteint après un séchage de 2 à 3 semaines était de 11 à 16%, donc jugé adéquat pour la conservation.

3.3. Affaissement

Le degré d'affaissement dû au séchage et à l'entreposage, au cours des 3 années, a été relativement similaire après quelques mois d'entreposage. Mesuré par rapport à une verticale, l'affaissement a varié de 0.7 à 0.9 m pour chacune des trois années, après trois mois d'entreposage; la variation étant plus grande entre les différents points de mesures, qu'entre les années. Le premier 0.30 m d'affaissement survient dans les quelques jours suivant la rentrée du foin.

3.4. Charges

3.4.1. Généralités

Pour la présentation des résultats, nous avons choisi d'exprimer les charges en fonction de la hauteur maximale du cône formé par les balles de foin dans la remise et non en fonction de la hauteur au mur. La figure 3.1 illustre la situation. La distance du cône de foin, par rapport au mur, peut donc influencer les forces exercées sur le mur, mais il s'agit d'une meilleure représentation de la réalité et des surcharges imposées au mur suivant l'angle de repos. Dans des situations autres (exemple: remplissage à plat), il serait nécessaire de calculer l'équivalent du cône si le remplissage avait eu lieu à un angle de 30 à 35°. Il en sera de même si l'angle est nettement plus élevé que 35°.

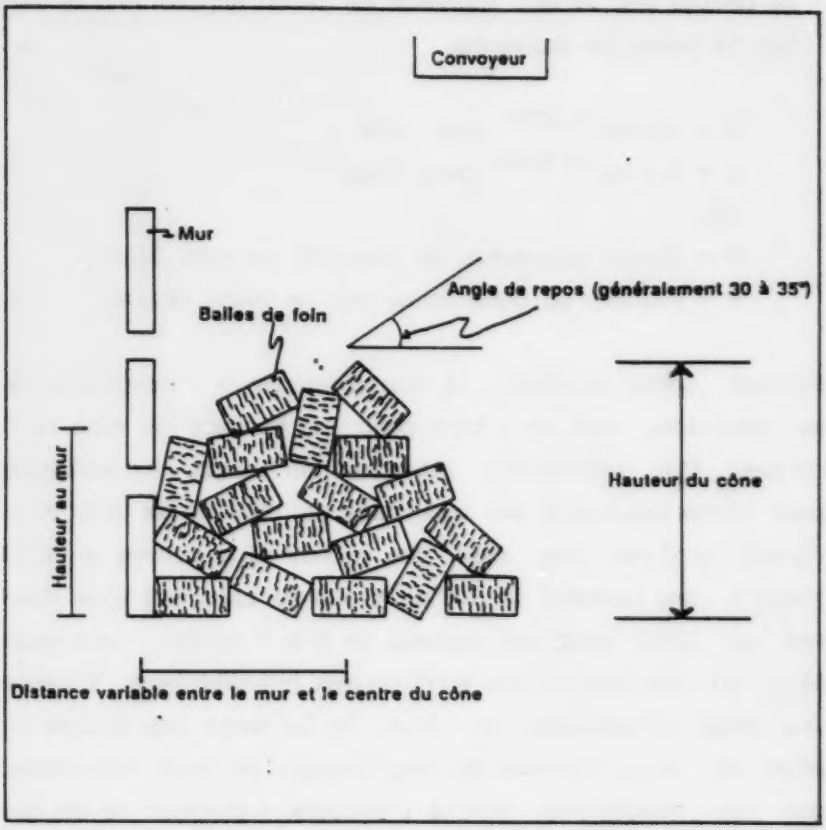


FIGURE 3.1: ILLUSTRATION DE LA HAUTEUR CHOISIE POUR L'INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

3.4.2. Charges verticales

Les résultats des mesures de charges verticales sont présentés aux figures 3.2 et 3.3 pour les années 1988 et 1989 respectivement. Les charges sont exprimées en kilonewtons par mètre de mur en fonction de la hauteur du cône du foin, telle que définie précédemment. Chaque

point de la figure représente une charge mesurée, à laquelle le poids du mur a été soustrait. On remarque que la charge sur le mur augmente de façon exponentielle selon la relation suivante:

$$W = 0.048e^{(0.63H)} \text{ pour 1988} \qquad (1)$$
$$w = 0.205e^{(0.403H)} \text{ pour 1989}$$

où:

W = charge par mètre de longueur de mur, kN/m

H = hauteur du cône formé par le foin, mètre.

Suivant cette relation, la charge maximale susceptible de se produire, est de 4 kN/m pour une hauteur de foin de 7 mètres. Une régression linéaire ne serait pas adéquate pour cette relation. Les résultats de 1988 et de 1989 diffèrent quelque peu avec une valeur plus élevée en 1989 jusqu'à une hauteur de 6.0 m, alors qu'elle est plus élevée en 1988 pour une hauteur de 6 à 7 mètres. Ceci peut être dû aux variations mentionnées précédemment, à cause des taux d'humidité du foin, de la masse des balles de foin et de la vitesse de remplissage. On peut considérer que ces conditions sont à l'extrême supérieur de ce qui peut être rencontré dans cette situation et selon les dimensions du bâtiment étudié.

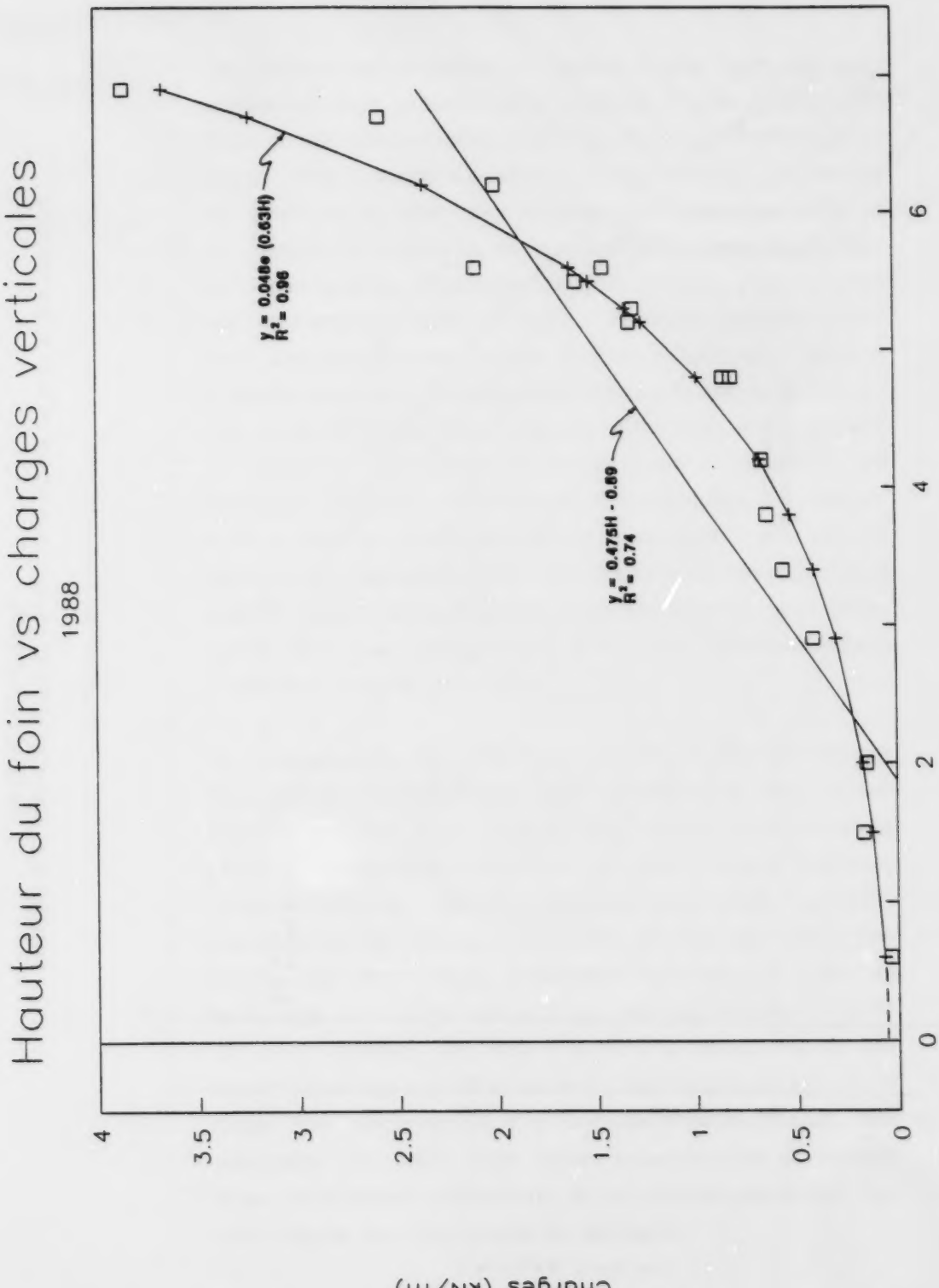


FIGURE 3.2: Relation entre la hauteur des balles de foin et les charges verticales pour 1988.

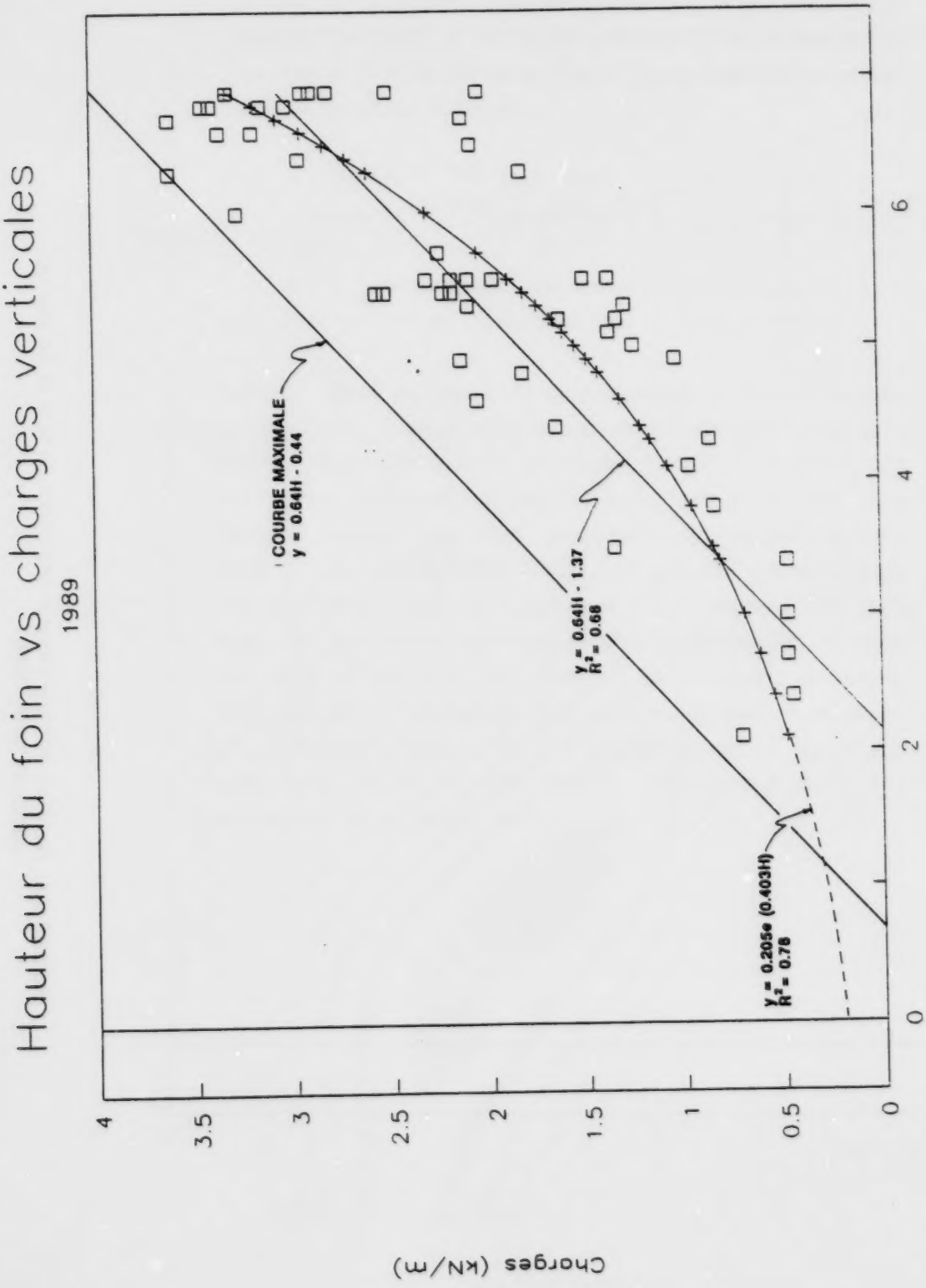


FIGURE 3.3: Relation entre la hauteur des balles de foin et les charges verticales pour 1989.

3.4.3. Charges horizontales

Les charges horizontales sur le mur d'essai ont été compilées et sont présentées à l'annexe D pour différentes dates. Les charges sont aussi exprimées sous forme graphique aux figures 3.4 et 3.5 ci-après, pour les essais de 1988 et de 1989. Les figures présentent les courbes de régression linéaire et exponentielle obtenues à partir des points d'observation. Des données près de zéro ont été enlevées pour établir l'équation exponentielle. Pour une hauteur des balles de foin allant de 2 jusqu'à 6 mètres environ, la régression linéaire donne des charges plus élevées, donc plus sécuritaires. Puisque dans la majorité des bâtiments, le foin est entreposé à des hauteurs souvent inférieures à 6.5 mètres, la régression linéaire est possiblement plus sécuritaire que la régression exponentielle. La régression exponentielle semble mieux suivre l'évolution des données pour 1988, alors que les deux courbes sont aussi représentatives l'une que l'autre pour 1989.

La comparaison des valeurs de 1988 et de 1989 montre des forces horizontales plus élevées en 1989. Elles sont d'environ 0.20 à 0.25 KN/m^2 supérieures selon la hauteur considérée soit d'environ 25% à faible hauteur, jusqu'à environ 10% à 7.0 mètres, par rapport à 1988. Cette situation pourrait être due, même si le taux d'humidité du foin était légèrement inférieur en 1989, au fait que le remplissage a été particulièrement rapide (2 à 3 jours), ce qui a causé une charge rapide des murs, sans que l'affaissement des balles n'ait eu le temps de compenser et diminuer ces charges. Ainsi, les résultats de 1989 sont plus sécuritaires et doivent être considérés comme tirés de situations extrêmes, tenant compte des dimensions du bâtiment.

Il faut noter que les valeurs de charges telles que présentées à l'annexe D ont été obtenues en divisant la somme des forces agissantes, à un niveau donné, par la superficie de la portion du mur qui contribue au soutien de la charge (KN/m^2 à la hauteur du point de contact des vérins). Les superficies sont indiquées à la figure 2.2 alors que les hauteurs retranchées sont de 0.0, 1.4, 3.0 et 4.5 mètres respectivement pour les vérins horizontaux des niveaux 1, 2, 3 et 4.

Les résultats montrent que la pression latérale augmente en fonction de la hauteur du foin, selon les relations suivantes:

Equations linéaires

$P = 0.291H - 0.36$ pour 1988 (2a)
$P = 0.289H - 0.19$ pour 1989 (2b)

Equations exponentielles

$P = 0.159\ e\ (0.35\ H)$ pour 1988 (2c)
$P = 0.251\ e\ (0.30\ H)$ pour 1989 (2d)

où:

P = pression sur le mur à une hauteur donnée, KN/m^2
H = hauteur du cône formé par le foin, mètre.

Les résultats obtenus ont été comparés aux données de la littérature concernant des produits tels le maïs-grain, les épis de maïs et la pomme de terre. Si on suppose que chaque unité de produit (grain, épi, balle de foin) représente un agrégat similaire, il va de soi que la grosseur des agrégats que représentent les balles de foin peut être la cause de phénomènes différents du grain. Aussi, le mode de fabrication du mur en ossature de bois est différente des murs d'un entrepôt à

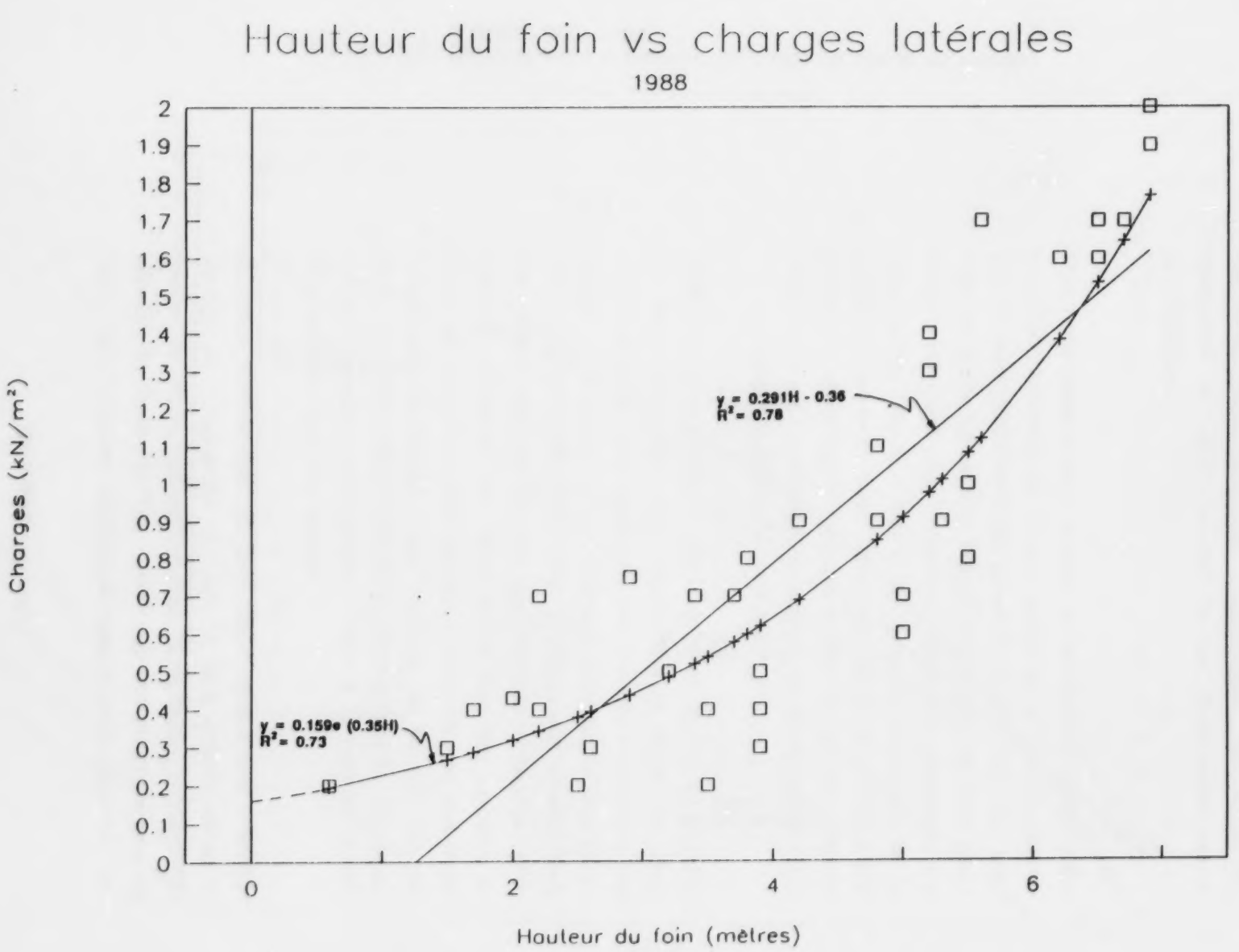


FIGURE 3.4: Relation entre la hauteur des balles de foin et les charges latérales pour 1988.

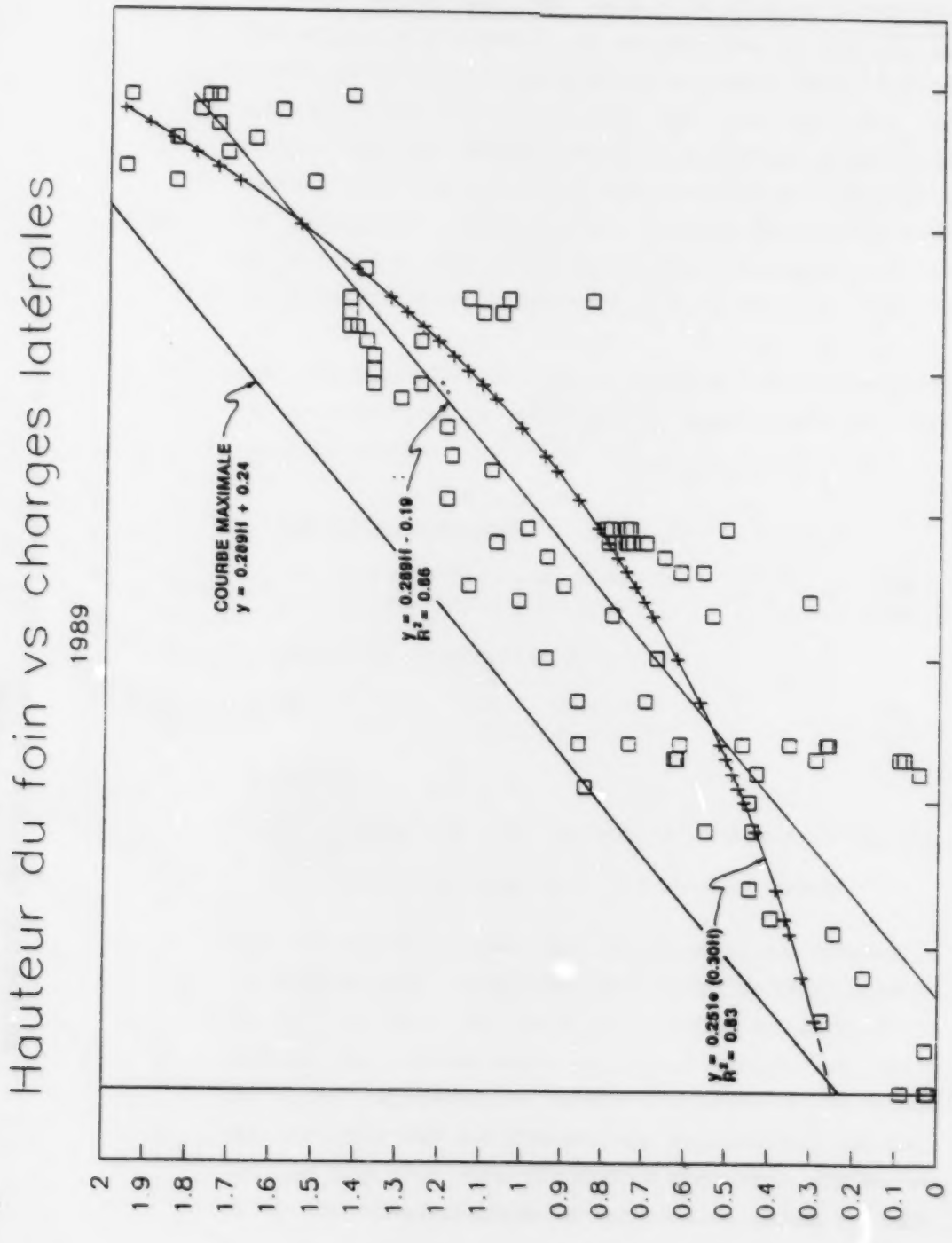


FIGURE 3.5: Relation entre la hauteur des balles de foin et les charges latérales pour 1989.

grain et peut favoriser l'accrochage des balles aux membrures et ainsi ajouter à la force verticale et horizontale.

Pour une hauteur de 5 mètres, le maïs-grain produit une pression latérale se situant entre 10 et 20 kPa, les épis de maïs produisent une pression de 3.8 kPa, les pommes de terre environ 10 kPa et les balles de foin pêle-mêle produisent une pression telle que présentée aux graphiques, de 1.3 kPa. C'est aussi l'équivalent de la pression moyenne d'un vent de 90 km/hre. Toutes ces pressions augmentent rapidement avec la hauteur. Cependant, on peut noter que la charge horizontale est faible en rapport à d'autres produits.

Selon les équations linéaires 2a et 2b, si la hauteur du foin est inférieure à 0.65 ou 1.24 mètre, la pression calculée est négative. Les mesures effectuées ont permis d'établir qu'il faut une hauteur de foin minimale, avant d'observer une pression sur le mur. Ceci est aussi confirmé par les observations visuelles. L'équation linéaire est donc valide pour des hauteurs de foin se situant entre environ 1 et 7 mètres. Les équations exponentielles, par contre, ne passent pas par zéro et sont même positives. Sur ce point, les équations linéaires correspondent mieux à la réalité observée sur les lieux des essais.

Un autre facteur dont il faut tenir compte dans l'utilisation de l'équation 2, est le taux d'humidité ou la masse du foin, puisqu'ils sont directement reliés. Les essais de 1988 et de 1989 ont été réalisés avec du foin, dont la masse variait au moment de la récolte, en-

tre 145 et 240 kg/m^3. Les équations 2 sont donc valides pour des balles de foin dont la masse se situe à l'intérieur de ces limites. Comme il n'est pas recommandable que du foin soit entreposé à des taux d'humidité supérieurs à 35%, même avec l'utilisation d'un séchoir, les équations 2 couvrent donc les situations les plus probables de se produire chez les producteurs.

Les valeurs des courbes donnent la pression par unité de surface à une hauteur de foin spécifique. On ne doit pas multiplier par la hauteur pour connaître la pression totale. Le concepteur de plan, lorsqu'il conçoit un mur soumis à une pression latérale, est intéressé de connaître la charge agissant sur le mur par unité de largeur de mur, mais sur toute la hauteur. La force latérale est donc obtenue par l'intégration de l'équation de pression sur la superficie considérée, tel que (basé sur les équations linéaires):

$$w = (0.291H-0.36)dH \qquad (3a)$$

ce qui donne:

$$w = 0.145H^2 - 0.36H \qquad (4a)$$

ou bien

$$w = (0.289H-0.19)dH \qquad (3b)$$

ce qui donne

$$w = 0.145H^2 - 0.19H \qquad (4b)$$

où:

w = force par mètre de largeur de mur, KN/m

H = hauteur du cône formé par les balles de foin, mètre

avec la force résultante agissant à une distance H/3 de la base du mur.

Même si la charge horizontale paraît faible en comparaison de d'autres situations, il faut tout de même porter une attention à ces surcharges et éviter de surcharger un mur sans équilibrer l'autre. Cette situation peut survenir à la vidange de la remise par l'agriculteur et elle s'est produite à la ferme étudiée, forçant la structure du bâtiment.

3.4.4. Coefficient de friction

Le ratio des forces verticales sur les forces latérales est défini comme étant le coefficient de friction. A une hauteur de 7.0 mètres, ce coefficient est de 0.60.

3.4.5. Résultats de 1987

Le taux d'humidité se situant entre 11% et 16% en 1987, les charges mesurées étaient en relation avec ces taux. Les mesures de pressions sur le mur et les hauteurs de foin correspondantes sont données à l'annexe D et présentées sous forme graphique à la figure 3.6. L'équation de régression obtenue à partir de ces données est telle que:

$$P = 0.126H - 0.086 \qquad (5)$$

Selon cette expression, la pression exercée sur le mur, pour une hauteur de foin égale à deux mètres, est proche de celles obtenues avec les équations 2. Par contre, pour des hauteurs de foin supérieures à 4 mètres, l'équation 5 donne des pressions inférieures, même à la moitié de celles calculées avec les équations 2.

Nous croyons donc qu'il serait plus sécuritaire de ne considérer que les mesures effectuées au cours de 1988 et 1989. De plus, pour 1987, les manomètres situés à la base du mur n'ont enregistré aucune pression. Ceci est dû à la présence de balles de foin près du mur sans toutefois le toucher, lors du premier remplissage. Les données de 1987 ne sont utiles que pour montrer l'influence d'un foin plus sec et ont servi à raffiner le protocole de prise de lecture au début de 1988. De plus, des irrégularités ont été observées en 1987, de sorte qu'il s'agit d'une série d'essais ne pouvant pas être utilisés pour tirer quelque conclusion que ce soit.

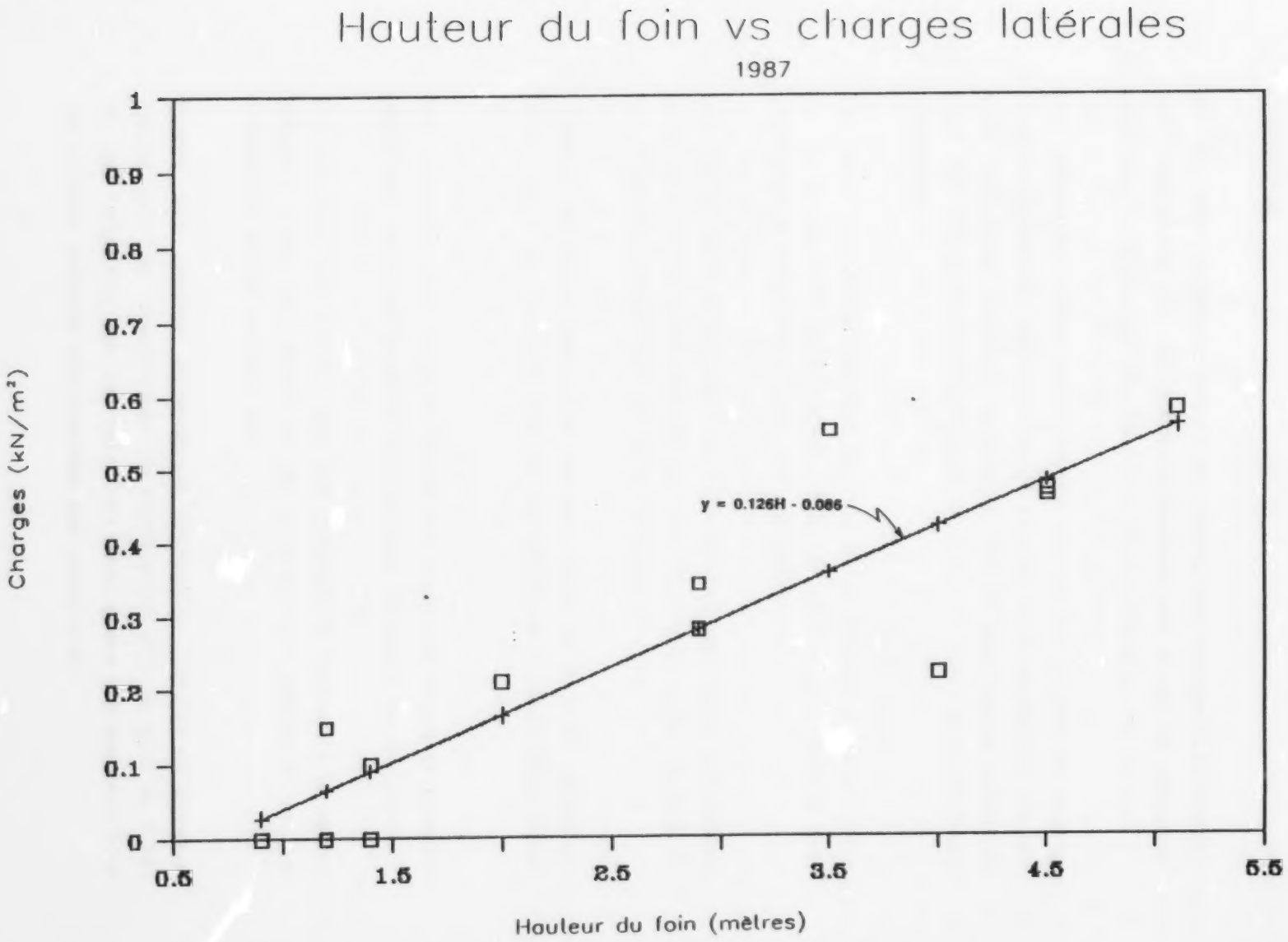


FIGURE 3.6: Relation entre la hauteur des balles de foin et les charges latérales pour 1987.

4. CONCLUSIONS

Le mur tel que conçu a permis de mesurer les charges additionnelles verticales et horizontales exercées sur un mur et occasionnées par l'entreposage des balles de foin pêle-mêle sur un mur.

Les relations entre la hauteur du foin et les charges correspondantes présentées dans le présent rapport sont basées sur les essais effectués au cours de 1988 et 1989 et sont jugées adéquates pour la majorité des conditions rencontrées chez les producteurs québécois.

Le taux d'humidité atteint en 1988 et la vitesse de remplissage de la saison 1989 apparaissent comme les conditions extrêmes susceptibles de se produire chez les agriculteurs.

Les relations développées en 1988 et 1989 sont très semblables, sauf que la relation de 1989 est plus élevée et donc, devrait être utilisée puisqu'elle est plus sécuritaire.

L'angle de repos des balles est de l'ordre de 30 à 40° généralement, mais on note de grandes variations se situant entre 25 et 60°.

Les charges sont faibles si on les compare à d'autres produits agricoles, mais suffisamment élevées pour ne pas être négligées.

Ces valeurs sont valides pour des largeurs de remise de 10 mètres environ, pour des hauteurs de foin de 0 à 7 mètres et un taux d'humidité allant jusqu'à 35%.

Toutes les courbes obtenues par régression linéaire ou exponentielle ont un coefficient de correlation (R^2) de plus de 0.74, ce qui signifie que les relations développées représentent bien les valeurs obtenues représentées aux graphiques.

5. RECOMMANDATIONS

Même si les relations mathématiques développées dans ce projet sont précises, il faut considérer qu'il s'agit de courbes de régression linéaires et exponentielles. Ceci signifie que des situations ou des valeurs mesurées se situent à un niveau plus élevé que la courbe et ces situations sont réelles. L'auteur n'engage pas sa responsabilité dans la conception des ouvrages basés sur ces courbes. Il ne fait que présenter les résultats obtenus du présent projet. Le concepteur ou les autorités agissantes devront utiliser, à la lumière de l'analyse des présentes données, un facteur de sécurité suffisant pour assurer la qualité des travaux.

Cependant, afin d'orienter les futurs utilisateurs, des droites passant par les points de force maximums obtenus au cours du projet ont été dessinées aux figures 3.3 (forces verticales) et 3.5 (forces horizontales). Les données de 1989 englobent les points maximums de 1988. Ces droites ont été tracées parallèles à la ligne de régression linéaire.

Ces équations linéaires deviennent donc:

$P = 0.64H - 0.44$ pour les forces verticales, et
$P = 0.289H + 0.24$ pour les forces horizontales

Aussi, il est recommandé que le concepteur applique un facteur de sécurité supplémentaire à ces lignes maximales.

RÉFÉRENCES

- American Society of Agricultural Engineers "Yearbook".

- Code Canadien du bâtiment agricole, 1977.

- Hall, C.W. "Drying and storage of agricultural crops." AVI Publishing Company. 1980.

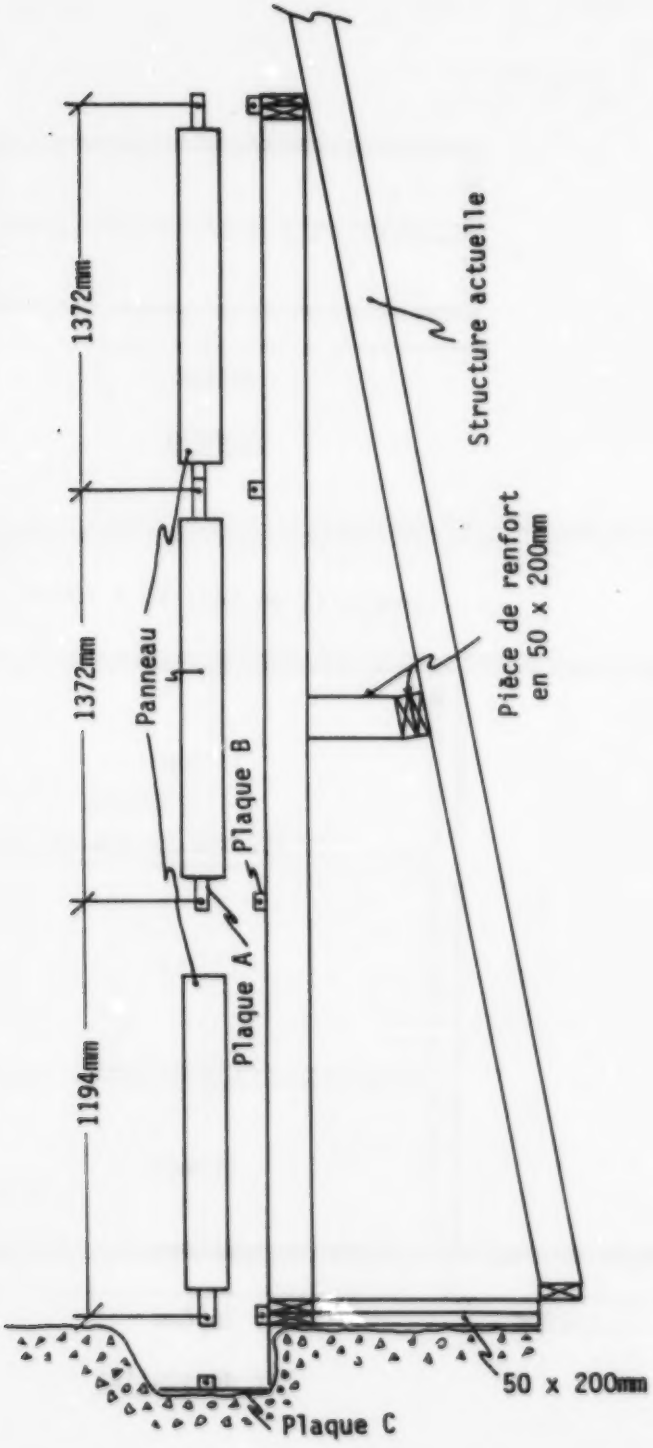
- Midwest plan Service, Structure and environment Handbook, 1976, MWPS-1.

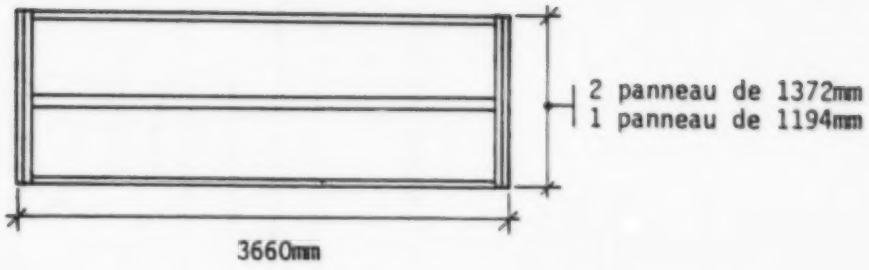
- Turnbull, J.E., D.I. Massé, W.S. Reid, 1987: Wall pressures for design of horizontal silos; Contribution No. I-920, from Engineering and Statistical Research Center, NRC Standing Committee on Farm Buildings.

ANNEXES

ANNEXE A

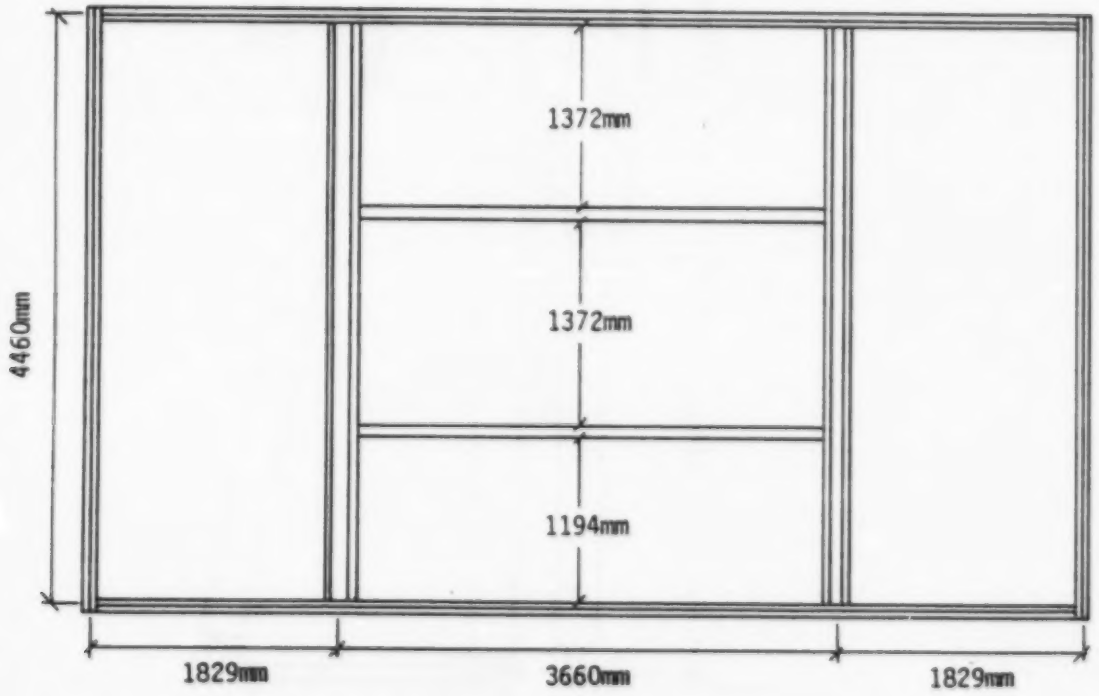
PLAN DU MUR


1372mm
1372mm
1194mm
Panneau
Plaque B
Plaque A
Plaque C
Structure actuelle
Pièce de renfort
en 50 x 200mm
50 x 200mm



Panneau

Armature: en bois 50 x 200mm



Mur de soutien

ANNEXE B

PHOTOS DU MUR ET DES VÉRINS

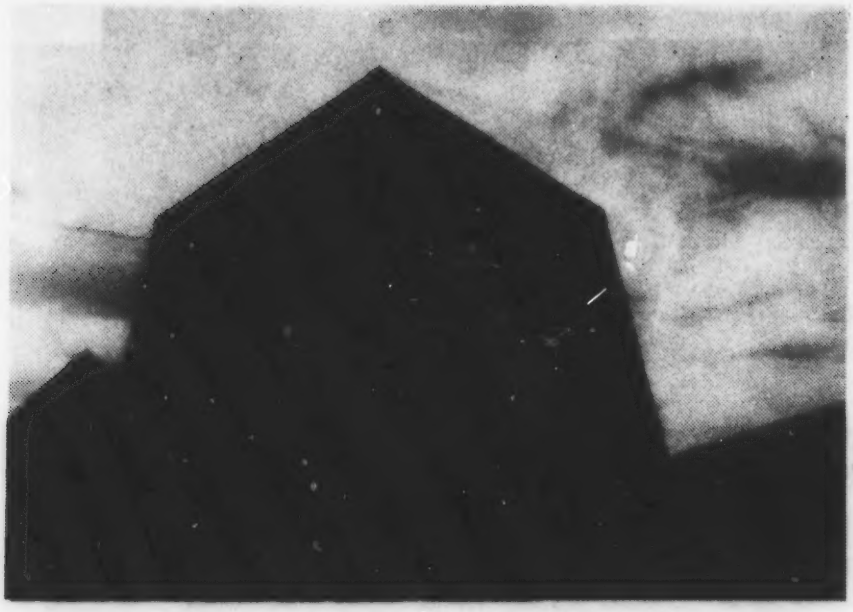


Photo 1: Grange et convoyeur à foin
où ont eu lieu les essais.

Photo 2: Vue du mur d'essai tel que construit.

Photo 3: Connexion des vérins horizontaux et verticaux à la base du mur.

Photo 4: Vérins tels qu'installés entre les premier et deuxième panneaux.

Photo 5: Vérin servant aux mesures de charges horizontales entre les deuxième et troisième panneaux.

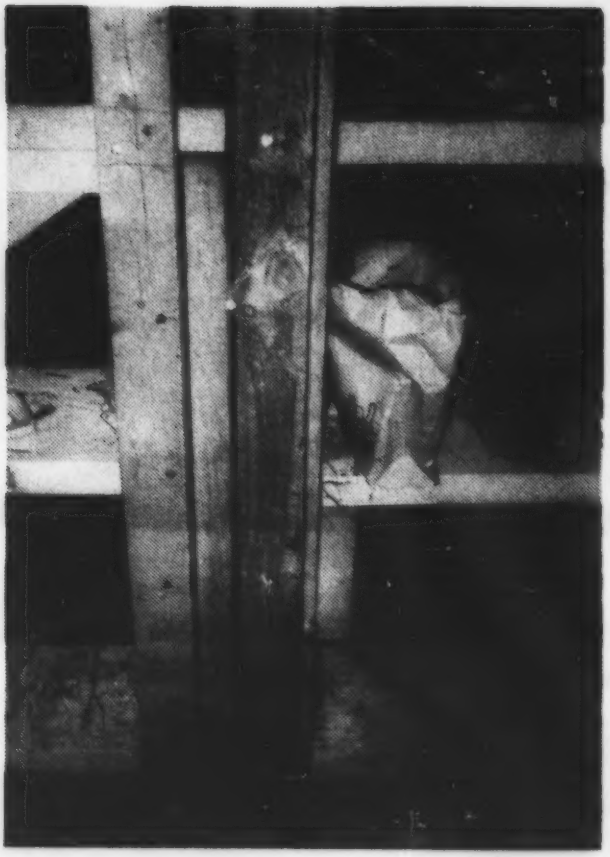


Photo 6: Vue du mur montrant l'emplacement d'un goujon entre une section fixe du mur et un panneau.

ANNEXE C

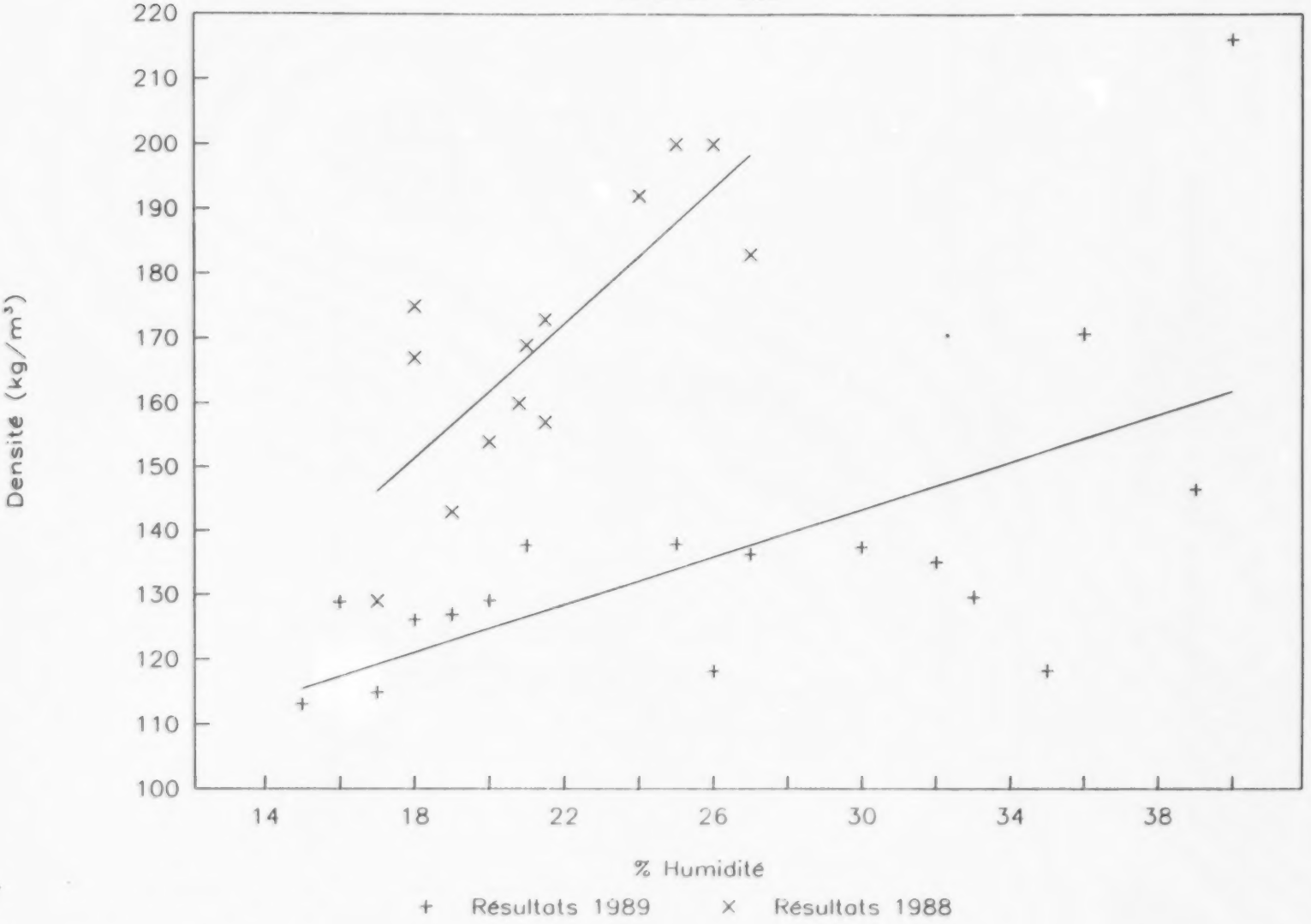
DENSITÉ DES BALLES DE FOIN
EN FONCTION DU TAUX D'HUMIDITÉ

RELATION ENTRE LE TAUX D'HUMIDITÉ ET LA DENSITÉ DES BALLES DE FOIN

% HUMIDITÉ	DENSITÉ 1988 (kg/m3)	DENSITÉ 1989 (kg/m3)
15	--	113
16	--	129
17	129	115
18	167	126
18	175	--
19	143	127
20	154	129
20.8	160	--
21	169	138
21.5	173	--
21.5	157	--
24	192	--
25	200	138
26	200	118
27	183	136
30	--	138
32	--	135
33	--	130
35	--	118
36	--	171
39	--	147
40	--	216

Taux d'humidité vs masse des balles

1988 et 1989



ANNEXE D
CHARGES MESURÉES

PRESSION VERTICALE (kN/m)
RÉSULTATS DE 1989

DATE	HEURE	HAUTEUR DU FOIN (mètres)	PRESSION VERTICALE (kN/m) *	HAUTEUR DU FOIN (mètres)	PRESSION VERTICALE (kN/m) **
30/06/89	5:00 pm	2.1	0.703	3.5	1.344
3/07/89	9:00 am	2.4	0.448	3.8	0.832
3/07/89	11:10 am	2.7	0.469	4.1	0.960
3/07/89	2:28 pm	3.0	0.469	4.4	1.642
3/07/89	4:52 pm	3.4	0.469	4.8	1.813
3/07/89	5:30 pm	4.3	0.852	5.7	2.239
4/07/89	10:30 am	4.9	1.023	6.3	1.813
4/07/89	4:00 pm	5.1	1.364	6.5	2.068
4/07/89	5:00 pm	5.3	1.279	6.7	2.111
6/07/89	4:17 pm	5.5	1.961	6.9	2.793
7/07/89	4:45 pm	5.5	1.492	6.9	2.495
8/07/89	5:15 pm	5.5	2.174	6.9	2.878
10/07/89	3:45 pm	5.4	2.557	6.8	3.432
13/07/89	4:26 pm	5.4	2.216	6.8	3.134
15/07/89	4:46 pm	5.4	2.515	6.8	3.390
17/07/89	5:30 pm	5.3	2.089	6.7	3.603
20/07/89	8:34 am	5.2	1.620	6.6	3.177
28/07/89	5:47 pm	5.2	1.321	6.6	3.347
28/08/89	4:00 pm	5.0	1.236	6.4	2.942
3/09/89	4:05 pm	4.9	2.131	6.3	3.603
6/12/89	1:30 pm	4.6	2.046	6.0	3.262
6/12/89	4:00 pm	5.5	2.302	6.9	3.304
7/12/89	1:15 pm	5.5	1.364	6.9	2.026
8/12/89	1:00 pm	5.5	2.089	6.9	2.921
8/12/89	3:30 pm	5.4	2.174	6.8	3.006
3/01/90	3:15 pm	5.4	2.515	6.8	4.924

* Vérins au niveau du sol
** Vérins intermédiaires

Note: La pression indiquée représente la somme des deux vérins pour un niveau donné, dont on a soustrait le poids du mur, montré par mètre de largeur.

PRESSION VERTICALES (kN/m)
RESULTATS DE 1988

DATE	HEURE	HAUTEUR DU FOIN (mètres)	PRESSION VERTICALE (kN/m) *	HAUTEUR DU FOIN (mètres)	PRESSION VERTICALE (kN/m) **
11/06/88	5:30 pm	0.6	0.04	2	0.15
11/06/88	6:13 pm	1.5	0.17	2.9	0.41
13/06/88	4:15 pm	3.4	0.56	4.8	0.81
13/06/88	5:15 pm	3.8	0.64	5.2	1.32
14/06/88	8:45 am	4.2	0.66	5.6	1.45
16/06/88	1:51 pm	4.8	0.85	6.2	2
16/06/88	2:18 pm	5.3	1.3	6.7	2.58
26/09/88	2:00 pm	5.5	1.59	--	--
30/09/88	9:00 am	5.6	2.1	6.9	3.86

* Vérins au niveau du sol
** Vérins intermédiaires

Note: La pression indiquée représente la somme des deux vérins pour un niveau donné, dont on a soustrait le poids du mur, montré par mètre de largeur.

PRESSION LATERALE (kN/m2)
RESULTATS DE 1989

DATE	HEURE	HAUTEUR DU FOIN (mètres) *	PRESSION LATERALE (kN/m2)	HAUTEUR DU FOIN (mètres) **	PRESSION LATERALE (kN/m2)	HAUTEUR DU FOIN (mètres) ***	PRESSION LATERALE (kN/m2)	HAUTEUR DU FOIN (mètres) ****	PRESSION LATERALE (kN/m2)
30/06/89	5:00 pm	3.5	1.136	2.1	0.846	0.5	0.275	0.0	0.023
3/07/89	9:00 am	3.8	1.069	2.4	0.864	0.8	0.176	0.0	0.000
3/07/89	11:10 am	4.1	1.191	2.7	0.866	1.1	0.248	0.0	0.029
3/07/89	2:28 pm	4.4	1.180	3.0	0.946	1.4	0.446	0.0	0.087
3/07/89	4:52 pm	4.8	1.301	3.4	1.015	1.8	0.440	0.3	0.029
3/07/89	5:30 pm	5.7	1.389	4.3	1.083	2.7	0.699	1.2	0.396
4/07/89	10:30 am	6.3	1.510	4.9	1.254	3.3	0.782	1.8	0.553
4/07/89	4:00 pm	6.5	1.720	5.1	1.368	3.5	0.903	2.0	0.448
4/07/89	5:00 pm	6.7	1.742	5.3	1.408	3.7	0.944	2.2	0.430
6/07/89	4:17 pm	6.9	2.073	5.5	1.425	3.9	0.994	2.4	0.355
7/07/89	4:45 pm	6.9	1.764	5.5	1.425	3.9	0.787	2.4	0.268
8/07/89	5:15 pm	6.9	1.951	5.5	1.425	3.9	0.798	2.4	0.262
10/07/89	3:45 pm	6.8	2.029	5.4	1.425	3.8	0.793	2.3	0.291
13/07/89	4:26 pm	6.8	2.029	5.4	1.425	3.8	0.699	2.3	0.093
15/07/89	4:46 pm	6.8	2.095	5.4	1.425	3.8	0.732	2.3	0.081
17/07/89	5:30 pm	6.7	2.007	5.3	1.425	3.7	0.655	2.2	0.047
20/07/89	8:34 am	6.6	1.841	5.2	1.385	3.6	0.562	2.1	0.000
28/07/89	5:47 pm	6.6	1.654	5.2	1.254	3.6	0.617	2.1	0.000
28/08/89	4:00 pm	6.4	1.962	5.0	1.368	3.4	0.308	1.9	0.000
3/09/89	4:05 pm	6.3	1.841	4.9	1.368	3.3	0.540	1.8	0.000
6/12/89	1:30 pm	6.0	2.051	4.6	1.191	3.0	0.672	1.5	0.000
6/12/89	4:00 pm	6.9	2.084	5.5	1.140	3.9	0.738	2.4	0.739
7/12/89	1:15 pm	6.9	1.422	5.5	0.838	3.9	0.507	2.4	0.465
8/12/89	1:00 pm	6.9	1.742	5.5	1.043	3.9	0.749	2.4	0.617
8/12/89	3:30 pm	6.8	1.786	5.4	1.060	3.8	0.749	2.3	0.628
3/01/90	3:15 pm	6.8	1.588	5.4	1.106	3.8	0.743	2.3	0.622

* Vérins au niveau du sol
** Vérins intermédiaires inférieurs
*** Vérins intermédiaires supérieurs
**** Vérins en haut du mur

Note: La pression indiquée représente la somme des deux vérins pour un niveau donné.

PRESSIONS LATERALES KN/m^2

1988

DATE	HEURE	HAUTEUR DU FOIN mètres *	PRESSION LATERALE KN/m^2	HAUTEUR DU FOIN mètres **	PRESSION LATERALE KN/m^2	HAUTEUR DU FOIN mètres ***	PRESSION LATERALE KN/m^2	HAUTEUR DU FOIN mètres ****	PRESSION LATERALE KN/m^2
11/6/88	17:30	2	.43	0.6	.2	0	0	0	0
11/6/88	18:13	2.9	.75	1.5	.3	0	0	0	0
13/6/88	16:15	4.8	1.1	3.4	.7	1.8	.15	0	0
13/6/88	17:15	5.2	1.3	3.8	.8	2.2	.4	0	0
14/6/88	8:45	5.2	1.4	3.8	.8	2.2	.4	0	0
15/6/88	17:30	5.6	1.7	4.2	.9	2.6	.3	0	0
16/6/88	13.51	6.2	1.6	4.8	.9	3.2	.5	1.7	.4
16/6/88	14:18	6.7	1.7	5.3	.9	3.7	.7	2.2	.7
14/7/88	16:40	6.9	1.9	5.5	1.0	3.9	.5	2.5	.2
26/9/88	15:30	6.9	1.9	5.5	0.8	3.9	.3	-	.
30/9/88	14:30	6.9	2.0	5.5	0.8	3.9	.4	2.5	.2
12/10/88	15:15	6.5	1.6	5.0	0.6	3.5	.2	2.0	0
31/10/88	11:00	6.5	1.7	5.0	0.7	3.5	.4	2.0	0

* Vérins au niveau du sol
** Vérins intermédiaires inférieurs
*** Vérins intermédiaires supérieurs
**** Vérins en haut du mur

Note: La pression indiquée représente la somme des deux vérins pour un niveau donné.

PRESSIONS LATERALES KN/m^2

1987

DATE	HEURE	HAUTEUR DU FOIN mètres	PRESSION LATERALE KN/m^2	HAUTEUR DU FOIN mètres	PRESSION LATERALE KN/m^2	HAUTEUR DU FOIN mètres	PRESSION LATERALE KN/m^2
28/8/87	16:20	1.2*	0.15	-1.2**	0	-	-
	16:35	4.0	0.22	1.4	0.1	0.9	0
	17:05	4.5	0.46	2.9	0.28	-	-
12/10/87	14:00	4.5	0.47	2.9	0.34	1.4	0
12/10/87	16:00	5.1	0.58	3.5	0.55	2.0	0.21

* hauteur supérieure à 1.2 mètre

** hauteur inférieure à 1.2 mètre.

Gouvernement du Québec
Ministère de l'Agriculture,
des Pêcheries et de l'Alimentation
Service du génie